

**П. П. ГОНТАРОВСКИЙ, А. А. ГЛЯДЯ, Н. Г. ГАРМАШ**

### **РАСЧЕТЫ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ БЛОКА УЗЛА ЗАМЕРА РАСХОДА ГАЗА**

С помощью разработанной на основе метода конечных элементов расчетной методики проведены исследования сейсмостойкости блока узла замера расхода газа на розжиг факельной системы при сейсмических нагрузках различной интенсивности, которые задаются с помощью реальных и синтезированной акселерограмм. Все элементы конструкции моделируются произвольно ориентированными стержнями и сосредоточенными массами с моментами инерции, которые соединяются между собой абсолютно жестко или с помощью упруго-демпферных элементов. Пластинчатые части конструкции моделируются решетками из стержней, учитывающими податливость и инерционные свойства ее элементов. Результаты проведенных исследований показали, что конструкция сейсмостойкая и не будет разрушена при ее эксплуатации.

**Ключевые слова:** блок узла замера, фундамент, сейсмограмма, напряженно-деформированное состояние, собственные частоты.

**П. П. ГОНТАРОВСЬКИЙ, А. О. ГЛЯДЯ, Н. Г. ГАРМАШ**

### **РОЗРАХУНКИ НА СЕЙСМОСТІЙКІСТЬ БЛОКА ВУЗЛА ВИМІРУ ВИТРАТИ ГАЗУ**

За допомогою розробленої на основі методу скінченних елементів розрахункової методики проведені дослідження сейсмостійкості блока вузла виміру витрати газу на розпал факельної системи при сейсмічних навантаженнях різної інтенсивності, які задаються за допомогою реальних і синтезованої акселерограм. Елементи конструкції моделюються довільно орієнтованими стержнями й зосередженими масами з моментами інерції, які з'єднуються між собою абсолютно жорстко або за допомогою пружно-демпферних елементів. Пластинчасті частини конструкції моделюються решітками зі стержнів, що враховують податливість і інерційні властивості її елементів. Результати проведених досліджень показали, що конструкція сейсмостійка й не буде зруйнована при її експлуатації.

**Ключові слова:** блок вузла виміру, фундамент, сейсмограма, напружено-деформований стан, власні частоти.

**P. GONTAROVSKIY, A. GLYADYA, N. GARMASH**

### **SEISMIC DESIGN OF THE BOX FOR THE GAS FLOW-RATE METERING UNIT**

To study seismic resistance of the box for the metering unit of gas flow-rate required to ignite the flare system we used the calculation methods developed on the basis of the method of finite elements and the software designed to define the mode of deformation and the dynamics of structures for the three-dimensional statement. To construct the simulation model, we took into account all the elements that affect the strength and the efficiency of the real structure during possible earthquakes. Structure elements were simulated using the sets of arbitrary oriented rods and lumped masses with inertia moments and those rods were connected absolutely rigidly with each other and using also elastically damped elements. The rod elements with distributed parameters took into consideration all the types of deformations that occur during the vibrations. The plate components of the structure were simulated using the grids made of the rods taking into consideration the ductility and inertia properties of its elements. Lumped masses in the rod connections were used to take into account the masses of installed equipment, pipelines, etc. The seismic loading was simulated using alternating inertia forces transferred from the ground. The soil ductility was taken into account by the Winkler model. Computations were done for the sand and rock stone ground and for the fine-grained sand. Consideration was given to the seismic forces of a different intensity that are represented by three-component accelerograms. Synthesized and real accelerograms were analyzed. The obtained computation data showed that the structure of the box of the metering unit of gas flow rate is quakeproof and it won't be destroyed during its operation.

**Key words:** the box of gas metering unit, the foundation, seismogram, mode of deformation and natural frequencies.

#### **Введение**

В связи с хозяйственным освоением сейсмо-активных территорий с каждым годом возрастает необходимость оценки сейсмостойкости зданий, сооружений и других объектов промышленности [1].

При проектировании нового оборудования высокие требования ставятся к его сейсмостойкости, то есть к сохранению прочности и работоспособности при сейсмических воздействиях. Поэтому важное значение приобретает оценка реакции конструкции на сейсмические воздействия. При этом прогнозируются силовые факторы, которые возникают в отдельных элементах, прежде всего в креплениях на фундаменте и узлах, обеспечивающих работоспособность всей конструкции. Расчетные модели должны учитывать конструктивные осо-

бенности и поведение системы при возможных землетрясениях.

#### **Цель работы**

Целью работы являются исследования сейсмостойкости блока узла замера расхода газа при сейсмических нагрузках различной интенсивности.

#### **Методика оценки сейсмостойкости**

Для анализа динамики конструкций различной сложности при сейсмических воздействиях на основе метода конечных элементов разработана расчетная методика и программное обеспечение [2]. Элементы расчетной схемы моделируются произвольно ориентированными стержнями и со-

средоточенными массами с моментами инерции, которые соединяются между собой абсолютно жестко или с помощью упруго-демпферных связей. В стержневых элементах с распределенными параметрами учитываются все виды деформаций, которые имеют место при колебаниях стержней. Пластиначатые составляющие конструкции моделируются решетками из стержней, учитывающими податливость и инерционные свойства ее элементов. Сосредоточенные массы в узлах стержней используются для учета массы установленного оборудования, трубопроводов и т.д. Сейсмическое нагружение моделируется переменными инерционными силами, передающимися от грунта. При этом податливость почвы учитывается моделью Винклера.

Сейсмическое влияние характеризуется колебанием грунта при землетрясении, которое вызывает кинематическое возбуждение колебаний исследуемого объекта. При этом сейсмическое влияние в общем случае представляется трехкомпонентными акселерограммами (записями ускорения во времени) для двух горизонтальных и вертикального направлений [3].

#### Постановка задачи

Колебания рассматриваемого блока узла замера расхода газа (рис. 1) рассматривались в правой декартовой системе координат  $x, y, z$ , где ось  $x$  направлена вертикально вверх, ось  $z$  – вдоль газовых трубопроводов, а ось  $y$  – в поперечном направлении. При сейсмическом воздействии эта система координат связана с движением грунта.

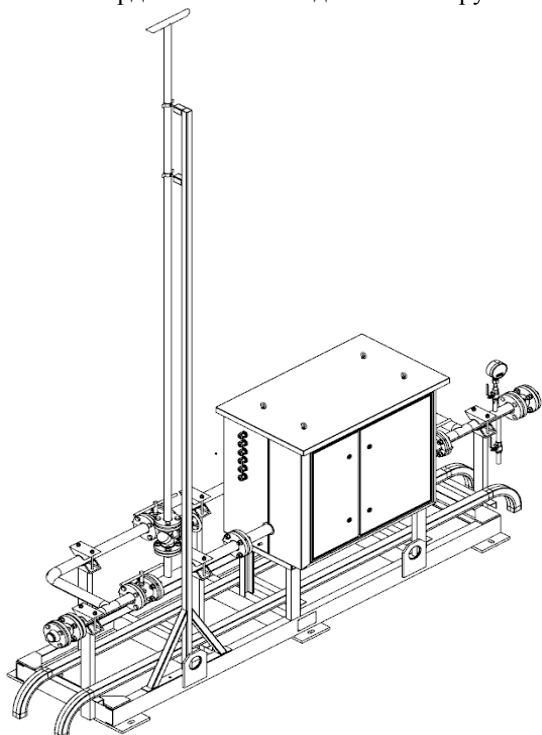


Рис. 1 – Блок узла замера расхода газа

Колебания грунта передаются на фундамент с учетом податливости грунта, заданной по модели Винклера. Расчеты проводились для песчано-щебеночного грунта и для мелкозернистого песка.

Фундаментная плита моделировалась бетонным стержнем с сечением  $1 \times 0,6$  м и длиной около 3 м. Жесткости Винклеровского основания на единицу длины стержня принимались равными  $C_x = 1970$  МПа,  $C_y = 1738$  МПа,  $C_z = 1298,7$  МПа,  $C_{xy} = 1030$  МН/рад для песчано-щебеночной подушки и в 20 раз меньшими для мелкозернистого песка. Размеры фундамента и жесткость грунта незначительно влияют на результаты расчетов данной конструкции, что будет показано ниже.

Рама из швеллеров № 12 крепится к фундаменту с помощью шпилек диаметром 16 мм. При использовании шпилек диаметром 10 мм результаты практически не изменяются.

Жесткость крепежных элементов принималась равной  $C_x = 2500$  МН/м,  $C_y = C_z = 1500$  МН/м. По деформации крепежных элементов при колебаниях определяются возникающие в них усилия. Трубопроводы диаметром 57 мм с толщиной стенок 4 мм и ящик измерительной системы крепятся к раме вертикальными швеллерами № 6, 5. Четыре задвижки, установленные на трубопроводах, моделировались сосредоточенными массами 12 кг, а измерительная система расхода газа – массой 21,4 кг. Крепежные элементы трубопроводов имели массу 1 кг, а фланцевое соединение – 5,4 кг. Вертикальный трубопровод свечи диаметром 37 мм с толщиной стенок 3 мм поддерживался кронштейном квадратного сечения  $40 \times 40$  мм с толщиной стенок 2 мм. Ящик для измерительной системы массой 182 кг моделировался металлическими ребрами квадратного сечения  $70 \times 70$  мм с толщиной стенок 10 мм.

Расчетная схема установки представлена на рис. 2.

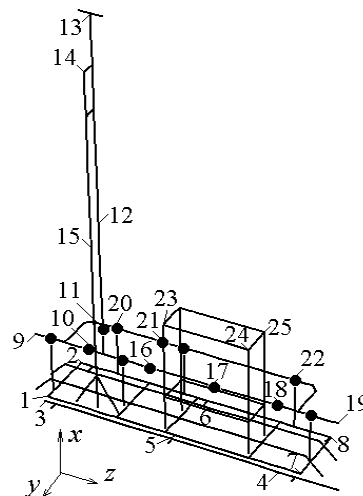


Рис. 2 – Расчетная схема конструкции: кружочки – массы; цифры – номера точек, в которых приведены амплитуды перемещений при сейсмическом воздействии

Ускорения грунта при землетрясении 8 баллов задавались оцифрованной синтезированной акселерограммой [4]. Она имеет переменную частоту воздействия, плавно изменяющуюся спектральную характеристику до 10 Гц [5] и является более жесткой по сравнению с реальными сейсмограммами.

Спектральные характеристики сейсмограмм реальных землетрясений достигают максимальных значений при частоте до 5 Гц. Сейсмограмма землетрясения в Иране (г. Тебес, 1978 г.) имеет сравнительно высокочастотную спектральную характеристику по сравнению с другими [5], поэтому расчеты для воздействия реального землетрясения проводились именно с ней.

### Результаты расчетов сейсмостойкости

Результаты расчетов собственных колебаний конструкции в диапазоне до 30 Гц для различных значений жесткости грунта приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Собственные частоты колебаний блока узла замера расхода газа, Гц

Номер частоты	Грунт	
	Мелкозернистый песок	Песчано-щебеночная подушка
1	2,148	2,1490
2	3,931	3,9330
3	13,034	13,041
4	19,218	19,553
5	19,620	19,699
6	20,562	20,696
7	21,167	21,451
8	22,452	22,474
9	23,987	24,159
10	26,040	26,238
11	28,107	29,025
12	28,759	29,888

Формы колебаний для первых пяти и двенадцатой частот колебаний приведены на рис. 3. При первой и второй форме колебаний происходит изгиб свечи и поддерживающего кронштейна по первой форме в направлении осей  $z$  и  $y$ . При третьей форме колебаний конструкции свеча с кронштейном синфазно изгибаются в направлении оси  $z$ , а при четвертой – по второй форме в направлении оси  $y$  вместе с трубопроводами и ящиком. Пятая форма характеризуется изгибом свечи с кронштейном в направлении оси  $y$ , причем заметны поперечные колебания основного трубопровода и ящика в противофазе с кронштейном и свечой. При шестой форме колебаний конструкции свеча и кронштейн вместе с трубопроводами изгибаются в противофазе в направлении осей  $y$  и  $z$ . На седьмой и двенадцатой частотах происходят колебания ящика измерительной аппаратуры в направлении осей  $y$  и  $z$  соответственно.

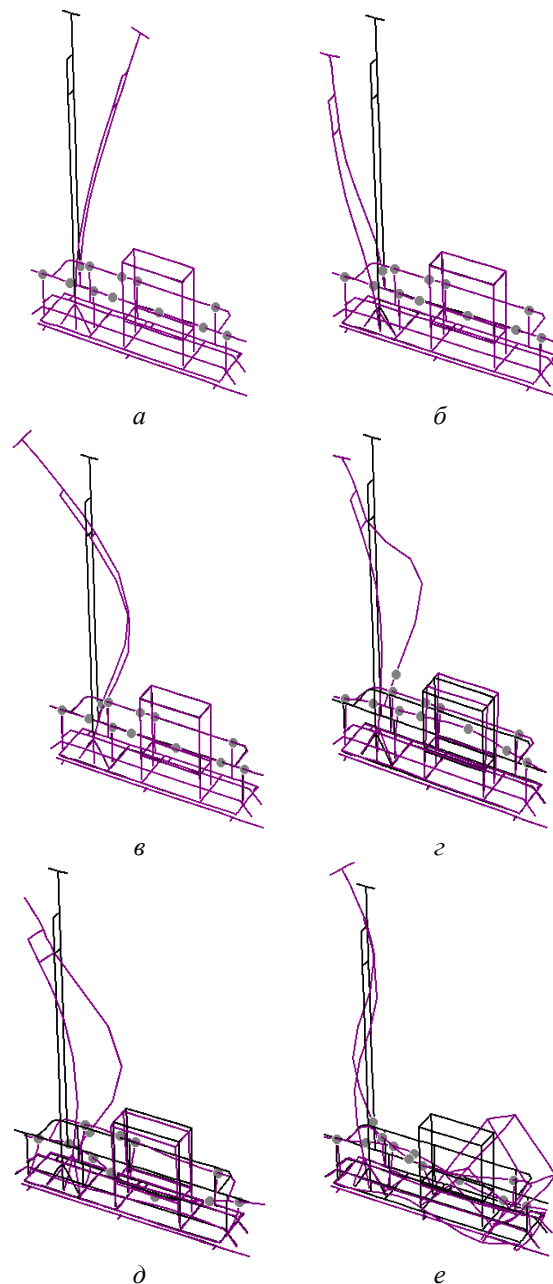


Рис. 3 – Формы свободных колебаний конструкции, соответствующие частотам (табл. 1):

$a$  – первая форма;  $б$  – вторая форма;  
 $в$  – третья форма;  $г$  – четвертая форма;  
 $д$  – пятая форма;  $е$  – двенадцатая форма

При сейсмическом воздействии возбуждаются колебания системы только по первой и второй формам. Остальные формы колебаний достаточно высокочастотные и при относительно низкочастотном сейсмическом воздействии практически не возбуждаются.

В таблице 2 приведены значения максимальных и минимальных перемещений с указанием направлений, в которых они совершаются, при расчете по синтезированной акселерограмме для менее жесткого грунта (мелкозернистый песок).

Таблица 2 – Перемещения точек блока

Точки блока	$U_{\max}$ , мм	Направ. оси	$U_{\min}$ , мм	Направ. оси
1	0,0723	y	-0,0529	y
2	0,0726	y	-0,0531	y
3	0,0725	y	-0,0520	y
4	0,0715	y	-0,0574	y
5	0,0729	y	-0,0566	y
6	0,0729	y	-0,0565	y
7	0,0720	y	-0,0629	y
8	0,0717	y	-0,0630	y
9	0,1690	z	-0,1680	z
10	0,1690	z	-0,1680	z
11	0,4370	z	-0,4090	y
12	3,2900	z	-2,5200	z
13	14,5000	z	-7,8200	z
14	12,1000	z	-7,2100	z
15	2,0700	z	-1,9600	y
16	0,2240	y	-0,2150	y
17	0,2700	y	-0,2580	y
18	0,1720	y	-0,1690	z
19	0,1700	z	-0,1690	z
20	0,1190	z	-0,1190	z
21	0,1310	y	-0,1260	y
22	0,1420	y	-0,1340	y
23	0,1770	y	-0,1430	y
24	0,2250	y	-0,1900	y
25	0,1890	y	-0,1550	y

Как видим, амплитуды перемещений верхней точки свечи не превосходят 14,5 мм, что не представляет опасности для рассматриваемой конструкции. Перемещения точек газовых трубопроводов в поперечном направлении не превышают 0,27 мм, а точек на входе и выходе газа – 0,17 мм относительно грунта. Таким образом, точки конструкции, которые находятся на уровне, не выше 1 м от верхней плоскости фундамента, перемещаются вместе с грунтом практически как твердое тело без существенных деформаций. Максимальные усилия в узлах крепления конструкции к фундаменту не превышают 54 кг, их значения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Максимальные усилия

Точки блока	1	2	5	6	7	8
$P_x$ , кг	10	35	39	53	35	14
$P_y$ , кг	23	30	34	31	25	29
$P_z$ , кг	29	30	30	13	53	21

В таблицах 4 и 5 приводятся результаты для более жесткого грунта (песчано-щебеночная подушка), отличие которых с результатами для податливого грунта не существенно.

В таблицах 6 и 7 приведены соответственно максимальные амплитуды перемещений точек конструкции и усилий в узлах крепления узла к фундаменту в случае действия восьмибалльной сейсмограммы землетрясения в Иране для случая более жесткого песчано-щебеночного грунта.

Таблица 4 – Перемещения точек блока

Точки блока	$U_{\max}$ , мм	Направ. оси	$U_{\min}$ , мм	Направ. оси
1	0,0079	x	-0,0082	x
2	0,0075	x	-0,0050	x
3	0,0018	y	-0,0018	y
4	0,0029	y	-0,0029	y
5	0,0078	y	-0,0134	x
6	0,0206	x	-0,0112	y
7	0,0050	x	-0,0089	x
8	0,0057	z	-0,0055	z
9	0,1350	z	-0,1340	z
10	0,1350	z	-0,1340	z
11	0,4020	z	-0,3630	y
12	3,2500	z	-2,4800	z
13	14,5000	z	-7,7700	z
14	12,1000	z	-7,1700	z
15	2,0100	y	-1,9100	y
16	0,1740	y	-0,1660	y
17	0,2150	y	-0,2040	y
18	0,1360	z	-0,1350	y
19	0,1360	z	-0,1350	z
20	0,0823	z	-0,0818	z
21	0,0820	z	-0,0815	z
22	0,0817	y	-0,0807	z
23	0,1220	y	-0,0871	y
24	0,1640	y	-0,1290	y
25	0,1330	y	-0,0977	y

Таблица 5 – Максимальные усилия

Точки блока	1	2	5	6	7	8
$P_x$ , кг	10	35	29	53	35	13
$P_y$ , кг	19	30	17	31	25	15
$P_z$ , кг	26	30	31	13	54	12

Таблица 6 – Перемещения точек блока

Точки блока	$U_{\max}$ , мм	Направ. оси	$U_{\min}$ , мм	Направ. оси
1	0,0054	x	-0,0053	x
2	0,0035	x	-0,0035	x
3	0,0022	y	-0,0015	y
4	0,0030	y	-0,0025	y
5	0,0083	y	-0,0054	y
6	0,0081	y	-0,0086	x
7	0,0049	y	-0,0031	y
8	0,0047	y	-0,0038	z
9	0,1020	z	-0,0923	z
10	0,1020	z	-0,0925	z
11	0,2630	y	-0,2710	y
12	1,8100	z	-1,9600	y
13	5,2000	z	-6,3600	z
14	4,9600	z	-5,7900	z
15	1,4000	y	-1,5800	y
16	0,1200	y	-0,1150	y
17	0,1470	y	-0,1370	y
18	0,1030	z	-0,0931	z
19	0,1030	z	-0,0931	z
20	0,0743	z	-0,0595	z
21	0,0742	z	-0,0593	z
22	0,0738	z	-0,0589	z
23	0,0811	y	-0,0827	y
24	0,1020	y	-0,1000	y
25	0,0864	y	-0,0867	y

Таблица 7 – Максимальные усилия в узлах крепления конструкции к фундаменту

Точки блока	1	2	5	6	7	8
$P_x$ , кг	9	25	22	40	33	11
$P_y$ , кг	28	20	20	28	17	21
$P_z$ , кг	29	27	23	11	43	8

Как видим из результатов проведенных расчетов, синтезированная акселерограмма оказывает более жесткие воздействия на рассматриваемую конструкцию.

### Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что при сейсмическом воздействии на блок узла замера расхода газа возбуждаются, в основном, только первые две формы колебаний при частотах около двух и четырех Герц. При этом перемещения верхней точки свечи на высоте около 4,7 м не превосходят 14,5 мм. Прогиб консольной металлической трубы такой длины не вызывает пластических деформаций. Остальные десять частот до 30 Гц при сейсмических влияниях практически не возбуждаются, поскольку они превышают 12 Гц.

Элементы металлической конструкции при сейсмическом воздействии перемещаются вместе с грунтом, практически не деформируясь. Перемещения точек трубопровода на входе и выходе газа не превосходят 0,17 мм относительно грунта. Очевидно, что если перемещения подсоединенных трубопроводов будут иметь такие же малые значения относительно земли, то возникновения существенных усилий в местах подсоединения ожидать не следует. Для определения этих усилий необходимо рассматривать данную конструкцию блока узла совместно с конструкцией подсоединенных трубопроводов.

### Список литературы

1. Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів. Практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. *Вісник НАН України*. 2015. № 2. С. 44–57. ISSN 1027-3239.

2. Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Шульженко Н. Г. Методика расчета динамики системы турбоагрегат-фундамент-основание энергоблоков при сейсмических воздействиях. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 8(1180). С. 153–160. Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.
3. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. О., Швецов В. Л., Гришин М. М., Губський О. М. Оцінка реакції потужного турбоагрегату на сейсмічне навантаження. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. № 2(82). С. 85–93. ISSN 2306-8744.
4. *РТМ 108.020.37-81. Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии*. Введ. 04.06.81. Ленинград: НПО ЦКТИ, 1981. 39 с.
5. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. А. Оценка колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание при сейсмических воздействиях. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 10(1232). С. 25–29. Бібліогр.: 7 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.03.

### References (transliterated)

1. Kendzera, O. V. (2015), "Seismic hazard assessment and protection against earthquakes. Practical applications of developments of Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine", *Herald of the Academy of Sciences*, No. 2, pp. 44–57, ISSN 1027-3239.
2. Gontarovskiy, P., Garmash, N. and Shulzhenko, N. (2016), "Methodology of calculation of the dynamics of the system turbine-foundation-base power units under seismic actions", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 153–160, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.
3. Shulzhenko, M. G., Gontarovskiy, P. P., Garmash, N. G., Glyadya, A. O., Shvetsov, V. L., Grishin, M. M. and Gubskiy, O. M. (2016), "Otsinka reaktsiyi potuzhnogo turboagregatu na seysmichne navantazhennya [Estimation of the reaction of a powerful turbine unit on the seismic load]", *Vibratsiyi v tekhniyi ta tehnologiiyah* [Vibration in engineering and technology], No. 2(82), pp. 85–93, ISSN 2306-8744.
4. (1981), *Oborudovanie atomnykh energeticheskikh ustanovok. Raschet na prochnost pri seysmicheskoy vozddeystviy: RTM 108.020.37-81* [The equipment of nuclear power plants. Calculation of the strength of the seismic impact: RTM 108.020.37-81], Central Boiler and Turbine Institution, Leningrad, Russian.
5. Shulzhenko, N., Gontarovskiy, P., Garmash, N. and Glyadya, A. (2017), "Estimating the Vibrations of Turbounit-Foundation-Base System Exposed to Seismic Loads", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 25–29, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.03.

Поступила (received) 29.11.2018

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гонтаровський Павло Петрович (Гонтаровский Павел Петрович, Gontarovskiy Pavel Petrovich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник; старший науковий співробітник відділу вібраційних і термомісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

**Глядя Алла Олександрівна (Глядя Алла Александровна, Glyadya Alla Aleksandrovna)** – ведучий інженер відділу вібраційних і термомісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

**Гармаш Наталія Григорівна (Гармаш Наталья Григорьевна, Garmash Nataliya Grigor'evna)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник; старший науковий співробітник відділу вібраційних і термомісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків, Україна; e-mail: garm.nataly@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4890-8152>.